

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170269

鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼生长和土壤理化性质的影响

李婉瑾¹ 王若水¹ 肖辉杰^{1,2} 王百田¹ 张克斌¹ 刘青青¹ 郭冰寒¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要【目的】为提高荒漠沙地植被的存活率和覆盖度, 本文以毛乌素沙地西南缘的沙木蓼为研究对象, 通过施用鲜海带生物酶解有机液肥, 研究其对沙地土壤理化性质和沙木蓼生长及群落物种多样性的影响。【方法】采用不同梯度的鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼进行1年的试验, 利用土壤水分测定仪测量土壤含水率, 凯氏定氮法测定土壤全氮含量, 重铬酸钾滴定法测定土壤有机质含量, 公式法计算群落物种多样性。【结果】(1) 该有机液肥有效地增加了土壤0~10 cm层的含水率, 且施用冲施肥研究区的土壤含水率较叶面肥研究区的高10.6%。(2) 土壤0~20 cm层的全氮和有机质的含量随着施肥量的增加而增加, 并在施肥量为15 mL/m²时达到最高, 与对照间差异显著($P < 0.05$), 且叶面肥处理的有机质含量远高于冲施肥。(3) 该有机液肥有效地促进了沙木蓼的生长, 沙木蓼地径、株高和新梢增长量均随着施肥量增加而呈先增加后减小的趋势, 在施肥量为6 mL/m²时达到最大, 与对照差异显著($P < 0.05$), 且冲施肥的效果要比叶面肥更优。(4) 该有机液肥增加了沙木蓼群落的物种组成、Margalef物种丰富度指数、Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数。【结论】鲜海带生物酶解有机液肥能够增加毛乌素沙地土壤水分与养分的含量, 促进沙木蓼的生长, 有助于毛乌素沙地植被的恢复, 更好地发挥其生态效益。

关键词: 土壤含水率; 土壤全氮; 土壤有机质; 物种丰富度; 物种多样性

中图分类号: S728.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2018)07-0062-11

引文格式: 李婉瑾, 王若水, 肖辉杰, 等. 鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼生长和土壤理化性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 62-72. Li Wanjin, Wang Ruoshui, Xiao Huijie, et al. Effects of fresh seaweed bio-enzymatic organic fertilizer on the growth and soil physicochemical properties of *Atraphaxis bracteata* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(7): 62-72.

Effects of fresh seaweed bio-enzymatic organic fertilizer on the growth and soil physicochemical properties of *Atraphaxis bracteata*

Li Wanjin¹ Wang Ruoshui¹ Xiao Huijie^{1,2} Wang Baitian¹ Zhang Kebin¹ Liu Qingqing¹ Guo Binghan¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, Beijing 100083, China)

Abstract [Objective] In order to improve the survival rate and coverage of desert vegetation, a field experiment by adding fresh seaweed bio-enzymatic liquid organic fertilizer on the *Atraphaxis bracteata* located in the southwest of Mu Us Desert, Ningxia of northwestern China, was carried out to study its effect on soil physicochemical properties, growth and community species diversity of *Atraphaxis bracteata* in desert ecosystems. [Method] Using a different gradient of fresh seaweed bio-enzymatic organic fertilizer to conduct a one-year test on *Atraphaxis bracteata*, the soil moisture was measured by soil moisture meter, soil total nitrogen was measured by Kjeldahl method, soil organic matter was measured

收稿日期: 2017-07-26 修回日期: 2018-01-23

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504402-3), 基于荒漠化防治和盐碱地改良的海藻肥施用技术(2016HXFWsBXy002), 国家人力资源和社会保障部留学人员科技活动项目择优资助项目。

第一作者: 李婉瑾。主要研究方向: 荒漠化防治。Email: 1429634479@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 肖辉杰, 博士, 副教授。主要研究方向: 林业生态、森林水文、盐碱地治理。Email: herr_xiao@hotmail.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

by potassium dichromate titration, and species diversity was calculated by formula method. [Result] (1) Fresh seaweed biological enzyme liquid organic fertilizer can increase soil moisture content in 0–10 cm layer effectively, and the soil moisture content of flush fertilization was 10.6% higher than that of foliar fertilizer application area. (2) The content of soil total nitrogen and organic matter in 0–20 cm layer increased with the increase of fertilizing amount and reached peak value when the fertilizing amount was 15 mL/m², and there was significant difference compared with control ($P < 0.05$). The content of organic matter treated with foliar fertilizer was much higher than that of flush fertilizer. (3) The fresh liquid organic fertilizer promoted the growth of *Atraphaxis bracteata* effectively, the growth of its ground diameter, plant height and new shoot all increased first and then decreased with the increase of fertilizing amount, and reached peak value when the fertilizing amount was 6 mL/m², and there was significant difference compared with control ($P < 0.05$). The effect of flush fertilization was better than foliar fertilizer. (4) The fresh seaweed bio-enzymatic liquid organic fertilizer increased the species composition, Margalef species richness index, Simpson dominance index and Shannon–Wiener diversity index of *Atraphaxis bracteata*. [Conclusion] Fresh seaweed bio-enzymatic liquid organic fertilizer can increase the content of soil moisture and nutrients in Mu Us Desert, promote the growth of *Atraphaxis bracteata*, contributes to the restoration of vegetation in Mu Us Desert, and then the vegetation can give better play to the ecological benefits.

Key words: soil moisture content; soil total nitrogen; soil organic matter; species richness; species diversity

荒漠化是全球性的重大环境问题,我国是世界上荒漠化危害最严重的国家之一。目前我国为防治荒漠化进一步的扩展,采取了最有效、最稳定的植被建设措施—封沙育林育草恢复天然植被^[1]。在生态环境恶劣,水资源短缺的荒漠化地区进行植被恢复,需要种植耐旱节水型树种。在毛乌素沙地区域,沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)是该地区主要造林树种之一,具有较好的固沙作用。但在沙木蓼生长到第4年以后,其株高和地径的生长量均下降,并有枝条枯死现象,需要平茬更新^[2];这不仅会增大荒漠化地区造林工程的工作量,也会减缓荒漠化地区植被恢复速度,减弱人工沙木蓼群落的稳定性。此外,沙木蓼虽能在土壤水分含量较低的沙地中生长,但由于其根系分布较广,消耗水量多,深层及周边土壤水分得不到补充^[3],导致沙木蓼周围植物群落物种数减少,周围物种较为单一,影响着沙木蓼造林区的植物多样性。因此,有必要实施一些措施促进沙木蓼生长,增加群落植物多样性,改善荒漠化地区的土壤理化性质。

在荒漠生态系统中,水分和养分共同限制着植物的生长和繁殖^[4]。施肥就是促进植物生长和繁殖的有效措施,也是恢复荒漠化草地植物群落多样性的主要途径之一^[5–9]。目前在荒漠地区的植被恢复过程中,水分与养分的调控措施大多都是施用氮、磷肥等无机肥料,但长时间过量施用容易造成土壤酸碱度不平衡、土壤板结、环境污染^[10]。而有机肥

不仅可以改善土壤的物理、化学和生物学性状,还可以扩大土壤的有效养分库,从而改善土壤的养分状况,提高养分的供给力^[11]。马红梅等研究发现:对荒漠区造林植物进行专用有机肥和化学肥料的混合施用,能够显著增加其株高、分枝数、层数、主茎直径、冠幅、鲜质量和干质量,提高其耐旱性^[12]。更有研究表明施肥改变了土壤的养分含量分布,影响着造林区的植物群落多样性的变化^[13–14]。

虽然有机肥的养分全面,种类多,但目前使用的有机肥大多为粪尿肥、堆沤肥、绿肥和杂肥,其养分释放慢,常常会带某些有害成分,例如臭味、病原菌、寄生虫卵和重金属等。而鲜海带生物酶解有机液肥是一种新型的有机液肥,采用100%新鲜海带为原料,应用海藻超微破碎技术和微生物酶解技术,提高了各营养物质和天然植物活性因子的提取率,保留了海带提取物的多样性和生物活性。富含植物所需的多种营养物质、微量元素和天然植物生长刺激素,对水果类、蔬菜类和粮油类都具有增产的效果。根据 Xu 等对藻类有机肥研究表明,叶面喷施藻类有机肥可促进冬小麦智能化生长,增粗抗倒状,显著提高了单株穗质量的同时,增加了土壤密度,提高小麦籽粒的物理品质,有利于叶片叶绿素的合成和缓解叶绿素的分解^[15]。Liu 等利用藻类有机肥对蔬菜种子萌发和幼苗生长的研究表明,藻类有机肥对提高发芽率和细苗壮苗具有较好的效果^[16]。目前藻类有机肥主要应用在果蔬类农作物上,并具有显著的

效果,但在荒漠化地区沙生植物上应用的效果尚待进一步研究。

因此,本文选择宁夏盐池植被恢复区中的5年生沙木蓼作为研究对象,通过人工控制不同梯度的鲜海带生物酶解有机液肥施用量的试验处理,探讨该有机液肥对荒漠化地区土壤理化性质以及沙木蓼生长和群落物种多样性的影响,以期为荒漠化地区植被恢复提供理论支持,为在荒漠化造林区沙木蓼的管理和植被恢复提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏盐池荒漠生态系统国家定位观测研究站(107°20′~107°26′E,37°04′~37°10′N),该站位于我国半干旱区毛乌素沙地西南缘的盐池县沙泉湾,总面积2000 hm²,地处黄土高原南部水蚀区与鄂尔多斯高原风蚀区的边界线附近,属鄂尔多斯

台地。该区海拔为1354 m,常年干旱少雨,蒸发量大,风大沙多,属典型的中温带大陆性季风气候,年平均温度为8.1℃,年降雨量280 mm左右,降水主要集中在夏秋两季,7—9月降水合计占全年总降水量的62%;光能丰富,热量较适中,年太阳辐射值为586 J/cm²,年蒸发量为2100 mm,年无霜期为165 d。植被类型有灌丛、草原、沙地植被、草甸和荒漠植被。该地区土壤为风沙土,地表物质疏松,土壤贫瘠,沙源物质丰富,风大且频,风沙活动强烈^[17]。为防治该地区沙漠化进一步的扩展,主要实行封沙育林育草恢复天然植被和造林种草固沙措施,沙木蓼是造林固沙的主要灌木之一。

试验开始时,土壤0~20 cm的全氮含量为15 g/kg,土壤0~20 cm的有机质含量为9.51 g/kg,土壤0~10 cm的含水率在4%~6%之间,样方中沙木蓼调查情况如表1所示,沙木蓼的地径和株高差异不显著($P>0.05$)。

表1 沙木蓼地径与株高的原始值分析

Tab.1 Analysis on original values of ground diameter and tree height of *Atraphaxis bracteata* cm

施肥处理 Fertilization treatment	植物指标 Plant index	肥料用量 Fertilizing amount					
		0	3 mL/m ²	6 mL/m ²	9 mL/m ²	12 mL/m ²	15 mL/m ²
冲施肥 Flush fertilizer	地径 Ground diameter	0.50a	0.49a	0.53a	0.54a	0.57a	0.53a
	株高 Plant height	104.87a	103.87a	119.67a	104.93a	106.40a	104.93a
叶面肥 Foliar fertilizer	地径 Ground diameter	0.50a	0.53a	0.49a	0.54a	0.56a	0.55a
	株高 Plant height	104.87a	103.33a	100.33a	108.73a	108.60a	104.67a

注:不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P>0.05$)。Note: different lowercases mean significant difference among varied treatments at $P>0.05$ level.

1.2 试验设计

1.2.1 试验肥料

本试验中使用的鲜海带生物酶解有机液肥是由山东省威海市世代海洋生物科技股份有限公司提

供,依据鲜海带生物酶解有机液肥种类,分为叶面肥和冲施肥2种,冲施肥随灌溉水施加,叶面肥利用喷雾器对植被叶片喷施。

表2 鲜海带生物酶解有机液肥主要成分

Tab.2 Main ingredients of fresh seaweed bio-enzymatic liquid organic fertilizer

液肥 Liquid fertilizer	主要成分 Main component
叶面肥 Foliar fertilizer	海带酶解液、海藻多糖、海藻蛋白、甘露醇、甜菜碱、赤霉素、吲哚乙酸、脱落酸、氨基酸等 Kelp hydrolysate, seaweed polysaccharide, seaweed protein, mannitol, betaine, gibberellin, indoleacetic acid, abscisic acid, amino acid, etc
冲施肥 Flush fertilizer	海带纤维、有机质、海藻多糖、吲哚乙酸、海藻蛋白、甘露醇、甜菜碱等 Kelp fiber, organic matter, seaweed polysaccharide, indoleacetic acid, seaweed protein, mannitol, betaine, etc

1.2.2 试验设置

2016年4月,在研究区域内选择地势平坦且5年生沙木蓼,设定2个区组,每个区组包含18个3 m×3 m的样方,每个样方之间有2 m的缓冲带。试验设置2种施肥方式,6个施肥量处理,每种施肥处理3个重复,水肥配比为1:200,6种肥料用量分别为:0

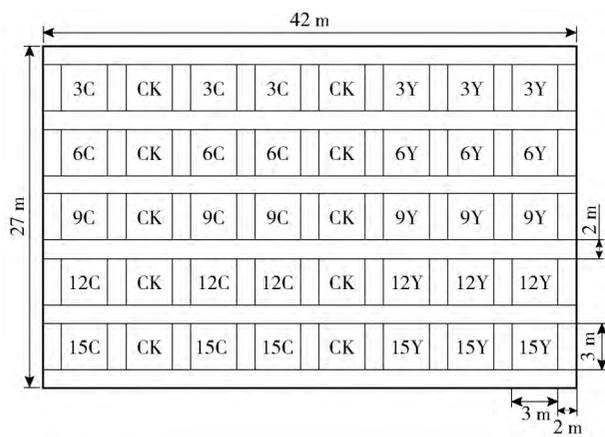
(对照CK)、3、6、9、12、15 mL/m²。于春季植物生长开始,每40 d施1次鲜海带生物酶解有机液肥,共施4次,不施肥的对照处理施等量的水分,施肥结束后进行补水措施,确保水分是控制变量,同时为了保证补水量不对施肥有影响,补水在施肥结束后第2天进行。施入的总水量是根据该研究区近10年降

水量集中的7—9月日平均降水量换算确定的。

表3 小区施肥用量

Tab.3 Fertilizing amount in 3 plots

肥料用量 Fertilizing amount/ (mL·m ⁻²)	小区肥料用量 Community fertilizing amount/mL	小区用水量 Community water consumption/mL	小区补水量 Community water recharge/mL
0	0	27 000	0
3	27	5 400	21 600
6	54	10 800	16 200
9	81	16 200	10 800
12	108	21 600	5 400
15	135	27 000	0



CK, 对照组; Y, 叶面肥; C, 冲施肥。数字表示肥料用量, 单位为 mL/m²。CK, control; Y, foliar fertilizer; C, flush fertilizer. The numbers represent the amount of fertilizer, the unit is mL/m².

图1 试验小区布设图

Fig.1 Layout of experimental plots

1.2.3 试验监测与采样

定期调查沙木蓼的地径、株高、新梢的生长情况,并在8月中旬植物生物量达到最大时,调查、记录各样方内植被的物种数、株高、密度和盖度。在7月初施肥结束后,对土壤0~10 cm含水量按对角线定点测量,测量频率是在施肥结束后的第1天(7月2日)、第4天(7月5日)、第9天(7月13日)、第16天(7月24日)和第25天(8月9日)的一个周期监测。同时,在生长期结束之后,进行土壤0~20 cm的取样,每个样方随机选取5个取样点,用直径3.5 cm的土钻取样,风干后过2 mm筛,带回实验室进行土壤化学性质的测定。

(1) 土壤理化性质的测定。土壤物理性质:土壤含水率用土壤水分测定仪(仪器型号:ML3,生产商:北京易科泰生态技术有限公司)测定。土壤化学性质:土壤全氮采用凯氏定氮仪法;土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加加热法。

(2) 物种丰富度的测定。物种丰富度用记名计算法测定,本研究中物种丰富度用1 m×1 m=1 m²样方内出现的物种数表示,即物种丰富度指数=出现在1 m²样方内的物种数^[18]。为了消除植物的不均衡分布的影响,本试验采用包含杂草密度和频度的相对丰度值(RA)作为衡量某种杂草重要程度的指标,其计算方式为:

$$RA = (RD + RF) / 2$$

式中:RD表示相对密度,小区中某种杂草的密度除以小区中所有杂草的密度之和;RF表示相对频度,小区中某种杂草的频度除以小区中所有杂草的频度之和。

(3) 物种多样性的测定。本研究中物种多样性选用Margalef物种丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性和Pielou均匀度指数来测定。

Margalef物种丰富度指数:

$$D_{MC} = (S - 1) / \ln N$$

式中:S为样方内物种种类数量,N为样方内中所有物种的个体数量。

Simpson优势度指数:

$$D_i = 1 - \sum P_i^2$$

式中:P_i为物种相对重要性,即物种的个体数在样方内所有物种个体数中所占的比例。

Shannon-Wiener多样性:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

Pielou均匀度指数:

$$J = \left(- \sum P_i \ln P_i \right) / \ln S, \text{ 即 } J = H' / \ln S$$

1.3 数据处理

数据用SPSS20.0进行单因素方差分析检验不同水平鲜海带生物酶解有机液肥的添加对荒漠化土壤理化性质、沙木蓼生长以及其群落物种多样性的影响,多重比较采用LSD检验,利用EXCEL2010制图。

2 结果与分析

2.1 鲜海带生物酶解有机液肥对土壤理化性质的影响

2.1.1 土壤含水率

土壤含水率关系到土壤养分的形成、转移和吸收,以及植株的正常生长^[19],适宜的土壤含水率能够促进有机肥的分解,提高肥料的利用率。而土壤含水率又与降雨量、土壤蒸发量有着密切的关系,据研究表明,在毛乌素沙地降水对土壤蒸发影响较大,降水使土壤水分增加,土壤中可供蒸发的水分充足,土壤蒸发就会增大^[20]。而从图2~4看出,7月4日降水为2.2 mm,蒸发量却由前一天的8.62 mm降为

5.77 mm 在叶面肥研究区内,7月5日的0~10 cm 土壤含水率高于其他测量时间的土壤含水率,因此,鲜海带酶解有机液肥有利于土壤保水。由图3、4可以看出,不同的施肥方式对土壤含水率具有不同的影响,冲施肥研究区的土壤含水率较叶面肥研究区提高了10.6%,且冲施肥土壤含水率较叶面肥的土壤含水率稳定,各处理间变化幅度在0.1%~0.4%之间,说明冲施肥比叶面肥更有利于土壤保水。

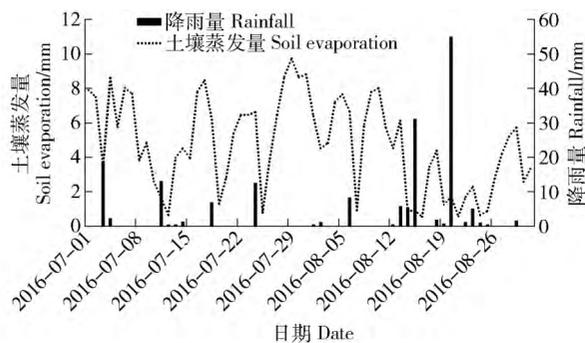


图2 2016年7—8月降雨量与土壤蒸发量
Fig. 2 Rainfall and soil evaporation during July to August in 2016

冲施肥研究区的土壤含水率日观测表明(图3),冲施肥可以增加土壤含水率,减小沙木蓼的耗水与蒸发。经过施肥处理的土壤含水率在施肥后第1天(7月2日)迅速增长之后,在7月5日、7月13日、7月24日和8月9日保持较稳定的状态,日变化幅度小于0.6%,施肥处理除了15 mL/m²的土壤含水率比对照低0.11%,其他施肥处理的土壤含水率均高于对照,是对照的109.39%~117.35%,并且随着冲施肥用量的增加,土壤含水率呈现先增加后减小的趋势。这是由于在高用量的情况下,植被因生理过程对水分的需求增大,土壤含水率就会降低。方差分析表明,除了8月9日的不同施肥处理间的土壤含水率的差异不显著($P > 0.05$)之外,其他时间的不同施肥处理间的土壤含水率均显著($P < 0.05$)。

叶面肥研究区的土壤含水率的变化幅度较冲施肥土壤含水率的大(图4),变化幅度在3.50%~10.00%之间。除了12 mL/m²的土壤含水率比对照高0.14%,其他施肥处理土壤含水率为对照的86.64%~96.45%。随着叶面肥用量的增加,土壤含水率呈现先降低后增加的趋势,可能是因为叶面肥利用喷施的方式,叶面吸收较多,用量小的叶面肥只能提供叶片的使用,无法进入土壤,导致叶面肥用量大的土壤含水率较高。方差分析表明,不同叶面肥处理土壤含水率差异不显著($P > 0.05$)。

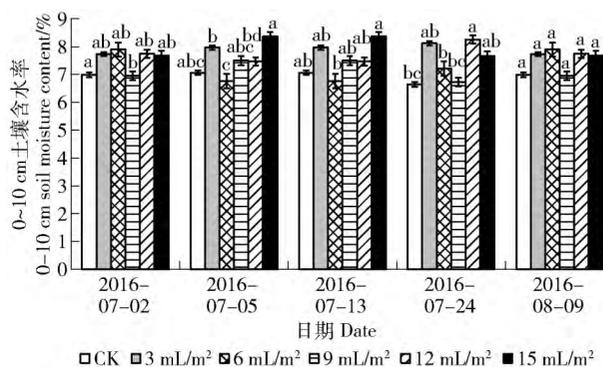


图3 冲施肥对沙木蓼土壤含水率的影响
Fig. 3 Effects of flush fertilizer on the soil water content of *Atraphaxis bracteata*

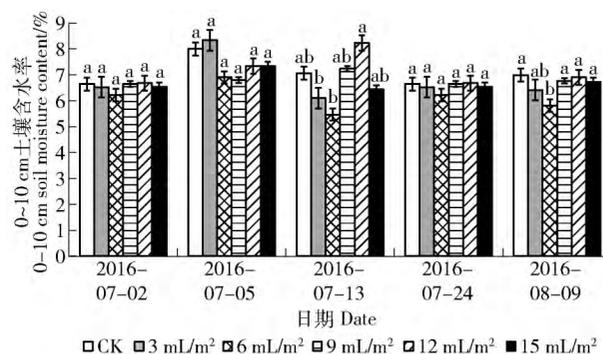


图4 叶面肥对沙木蓼土壤含水率的影响
Fig. 4 Effects of foliar fertilizer on soil water content of *Atraphaxis bracteata*

2.1.2 土壤全氮、有机质含量

毛乌素沙地的土壤母质不含氮,土壤中的氮主要靠施肥(包括有机肥和化学氮肥)和植物残体归还而补充^[21]。鲜海带生物酶解有机液肥增加了沙木蓼土壤0~20 cm层的全氮含量(图5),方差分析表明,冲施肥除了处理12 mL/m²与对照不显著,其余处理均与对照间差异显著($P < 0.05$),较对照增加了4.40%~37.14%。叶面肥除了处理3 mL/m²和12 mL/m²,其余处理均与对照差异显著($P < 0.05$),较对照增加了5.56%~31.43%。从土壤全氮的增加量来看,施冲施肥和叶面肥的效果一样,没有明显的差异。

土壤0~20 cm层的有机质含量随着鲜海带生物酶解有机液肥用量的增大而显著增加(图6),冲施肥的每个处理都与对照差异显著($P < 0.05$),处理3和6 mL/m²的有机质含量分别比对照低8.33%和8.57%,其他处理均高于对照,分别高出100%、200%和125%。叶面肥除了处理15 mL/m²的以外,其余处理的有机质含量均与对照差异显著($P <$

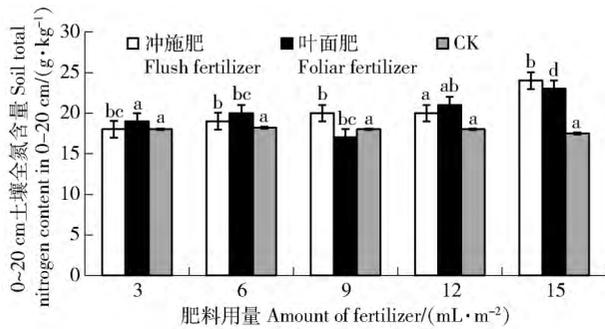


图5 施肥对土壤全氮的影响

Fig. 5 Effects of fertilization on soil total nitrogen

0.05) ,而处理 3 mL/m² 低于对照 4.16% ,其他处理的有机质含量分别比对照的高出 28.57% ~ 214.28% 。且冲施肥和叶面肥在肥料用量为 15 mL/m² 时 ,土壤有机质含量达到最大值。说明施鲜海带生物酶解有机液肥能有效促进沙化土壤有机质含量的增加 ,增加了土壤有效养分 ,且叶面肥的效果要优于冲施肥 ,其有机质增加量要比冲施肥高 0.46% 。

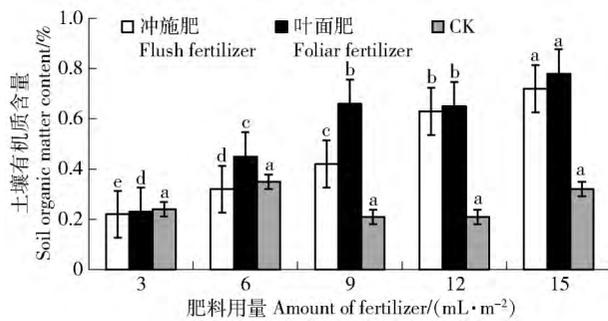


图6 施肥对土壤有机质的影响

Fig. 6 Effects of fertilization on soil organic matter

2.2 鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼生长的影响

沙木蓼地径增长量是随着鲜海带生物酶解有机液肥用量的增加呈先增加后减小的趋势(图7) ,冲施肥处理的增长量比叶面肥高 25.58% 。在冲施肥和叶面肥用量为 6 mL/m² 时 ,沙木蓼的地径增长量均达到最高 ,分别为 0.34 和 0.23 cm ;且与最高肥料用量的地径增长量存在显著差异($P < 0.05$) 。冲施肥用量为 3、15 mL/m² 的地径增长量均小于对照 ,分别是对照的 83.35%、93.35% ,且与 6 mL/m² 的地径增长量差异显著($P < 0.05$) ,其他处理均不存在显著差异($P > 0.05$) ;不同用量的冲施肥对地径增长量的效果依次是 6 mL/m² > 9 mL/m² > 12 mL/m² > CK > 15 mL/m² > 3 mL/m² 。叶面肥所有施肥处理的地径增长量均大于对照 ,分别比对照高 0.10、0.13、0.13、0.04 和 0.02 cm 。方差分析表明 ,在叶面肥用量为 6 和 9 mL/m² 的地径增长量都与用量为 15 mL/m² 差异显著($P < 0.05$) ,其他处理间不存在显著差

异($P > 0.05$) 。不同用量的叶面肥对地径增长量的效果依次是 6 mL/m² > 9 mL/m² > 3 mL/m² > 12 mL/m² > 15 mL/m² > CK 。说明施鲜海带生物酶解有机液肥能够有效地促进沙木蓼地径的增长 ,用量为 6 mL/m² 的地径增长量最高 ,且在两种施肥方式中 ,冲施肥比叶面肥的地径增长量更高。

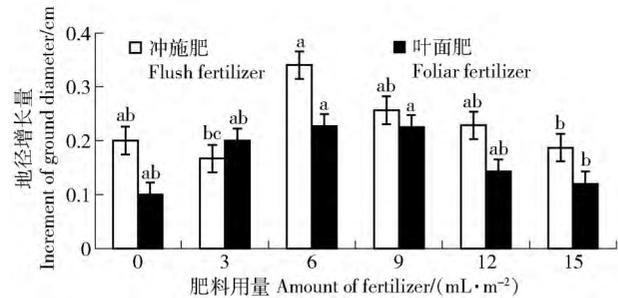


图7 施肥对沙木蓼地径增长量的影响

Fig. 7 Effects of fertilization on the growth of ground diameter of *Atraphaxis bracteata*

沙木蓼株高增长量随着鲜海带生物酶解有机液肥用量的增加呈先增加后减小的趋势(图8) ,冲施肥的株高平均增长量比叶面肥的高 71.6% 。冲施肥用量为 6 mL/m² 的株高增长量与对照存在显著差异($P < 0.05$) ,且各处理的株高增长量均高于对照处理 ,较对照高 7.33 ~ 23.28 cm ;不同冲施肥对沙木蓼株高增长量的效果依次是 6 mL/m² > 9 mL/m² > 12 mL/m² > 3 mL/m² > 15 mL/m² > CK ,各处理平均株高增长量是对照株高增长量的 169.88% 。叶面肥对沙木蓼株高增长量也具有增长趋势 ,但不存在显著差异($P > 0.05$) 。说明鲜海带生物酶解有机液肥能够有效地促进沙木蓼株高的增长 ,当鲜海带生物酶解有机液肥用量为 6 mL/m² 时的株高增长量最高 ,且冲施肥比叶面肥效果更优。

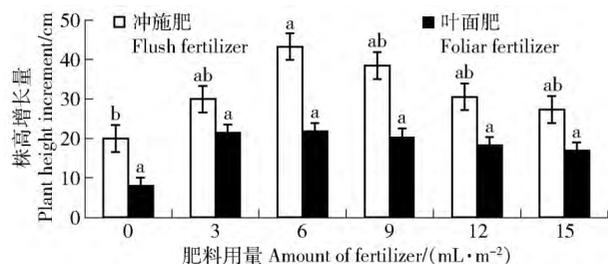


图8 施肥对沙木蓼株高增长量的影响

Fig. 8 Effects of fertilization on the tree height increment of *Atraphaxis bracteata*

沙木蓼新梢生长量随着鲜海带生物酶解有机液肥用量的增加呈先增加后减小的趋势(图9) ,冲施肥的新梢生长量要比叶面肥高 17.56% 。冲施肥用量为 6 mL/m² 的新梢生长量最大 ,与对照、12 和 15

mL/m^2 处理差异显著($P < 0.05$),与其他处理不存在显著差异($P > 0.05$)且不同施肥量处理的新梢生长量均比对照高 $9.39 \sim 31.73 \text{ cm}$ 。叶面肥用量为 $6 \text{ mL}/\text{m}^2$ 的新梢生长量最大,与对照差异显著($P < 0.05$),其他处理均不具有显著性($P > 0.05$),各处理的新梢生长量分别比对照高 $13.77 \sim 33.85 \text{ cm}$ 。不同处理的冲施肥和叶面肥对沙木蓼新梢生长量的效果依次是 $6 \text{ mL}/\text{m}^2 > 3 \text{ mL}/\text{m}^2 > 9 \text{ mL}/\text{m}^2 > 12 \text{ mL}/\text{m}^2 > 15 \text{ mL}/\text{m}^2 > \text{CK}$ 。说明鲜海带生物酶解有机液肥能够有效地促进沙木蓼新梢的增长,当鲜海带生物酶解有机液肥用量为 $6 \text{ mL}/\text{m}^2$ 时,新梢生长量最高,且冲施肥比叶面肥效果更好。

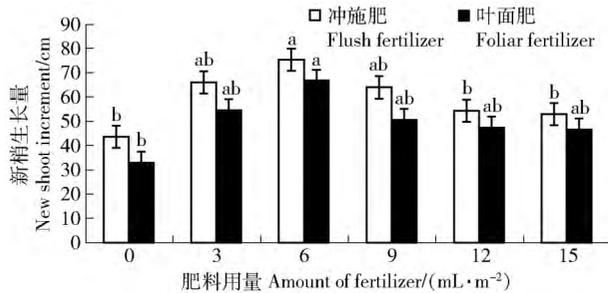


图9 施肥对沙木蓼新梢生长的影响

Fig. 9 Effects of fertilization on the growth of *Atraphaxis bracteata* new shoots

2.3 鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼周围物种相对丰度的影响

施肥对沙木蓼周围植物群落组成具有明显的影响。施冲施肥后物种数增加,随着冲施肥用量的增加而增加(表4),增加物种数一般为 $2 \sim 4$ 种;按照物种相对丰度 $\geq 10\%$ 为优势种群,冲施肥研究区主要优势种为杨柴(*Hedysarum fruticosum*)、白蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)。这些优势种的相对丰度值随着施肥量的增加而减小,相对丰度值 $\geq 5\%$ 的伴生植物冰草(*Agropyron cristatum*)的物种丰度随着施肥量的增加而增大,而主要优势种白蒿和油蒿在施肥量为 $6 \text{ mL}/\text{m}^2$ 下消失,也有一些植物如芦苇(*Phragmites australis*)、狗尾巴草(*Setaria viridis*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、角蒿(*Incarvillea sinensis*)会在施肥量为 $3 \text{ mL}/\text{m}^2$ 时,在群落中出现。

施叶面肥后各处理物种数均也增加(表5),随着叶面肥用量的增加,增加物种数一般为 $2 \sim 5$ 种;根据物种相对丰度,叶面肥的研究区主要优势种为杨柴和油蒿,随着施肥量的增大,主要优势种的相对丰度值减小,群落中增加其他物种,如冰草、芦苇、狗尾巴草和针茅(*Stipa capillata*)等。

表4 不同梯度冲施肥处理的物种相对丰度

Tab. 4 Relative abundance of species in different gradient treatments of flush fertilizer

物种名称 Species name	CK	$3 \text{ mL}/\text{m}^2$	$6 \text{ mL}/\text{m}^2$	$9 \text{ mL}/\text{m}^2$	$12 \text{ mL}/\text{m}^2$	$15 \text{ mL}/\text{m}^2$
杨柴 <i>Hedysarum fruticosum</i>	44.84	23.88	22.09	19.06	16.08	14.53
白蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	25.82	21.70	0	6.36	22.99	39.40
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	20.92	9.20	0	10.00	0	0
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	8.42	0	22.42	24.57	0	9.53
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0	14.48	6.30	0	0	12.15
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	0	17.70	19.76	18.66	15.54	12.37
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>	0	13.49	0	0	0	6.36
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	0	14.56	5.39	0	0	0
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	0	0	0	0	4.53	0

2.4 鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼群落物种多样性的影响

沙木蓼群落 Margalef 物种丰富度指数在不同施肥方式下具有不同的变化趋势(图10),冲施肥对 Margalef 物种丰富度指数的影响不显著($P > 0.05$),但用量为 $3 \text{ mL}/\text{m}^2$ 的 Margalef 物种丰富度指数与对照、用量为 $12 \text{ mL}/\text{m}^2$ 有显著差异($P < 0.05$);冲施肥各处理的 Margalef 物种丰富度指数

分别是对照的 209.98% 、 144.37% 、 138.81% 、 119.02% 和 157.68% 。叶面肥对 Margalef 物种丰富度指数具有显著影响($P < 0.05$),随着叶面肥用量的增加而增加,除了用量为 9 和 $12 \text{ mL}/\text{m}^2$ 处理间无显著差异,其他处理均差异显著($P < 0.05$);叶面肥各处理的 Margalef 物种丰富度指数分别是对照的 115.83% 、 137.81% 、 164.09% 、 193.11% 和 221.37% 。

表 5 不同梯度叶面肥处理的物种相对丰度

Tab. 5 Relative abundance of species in different gradient treatments of foliar fertilizer

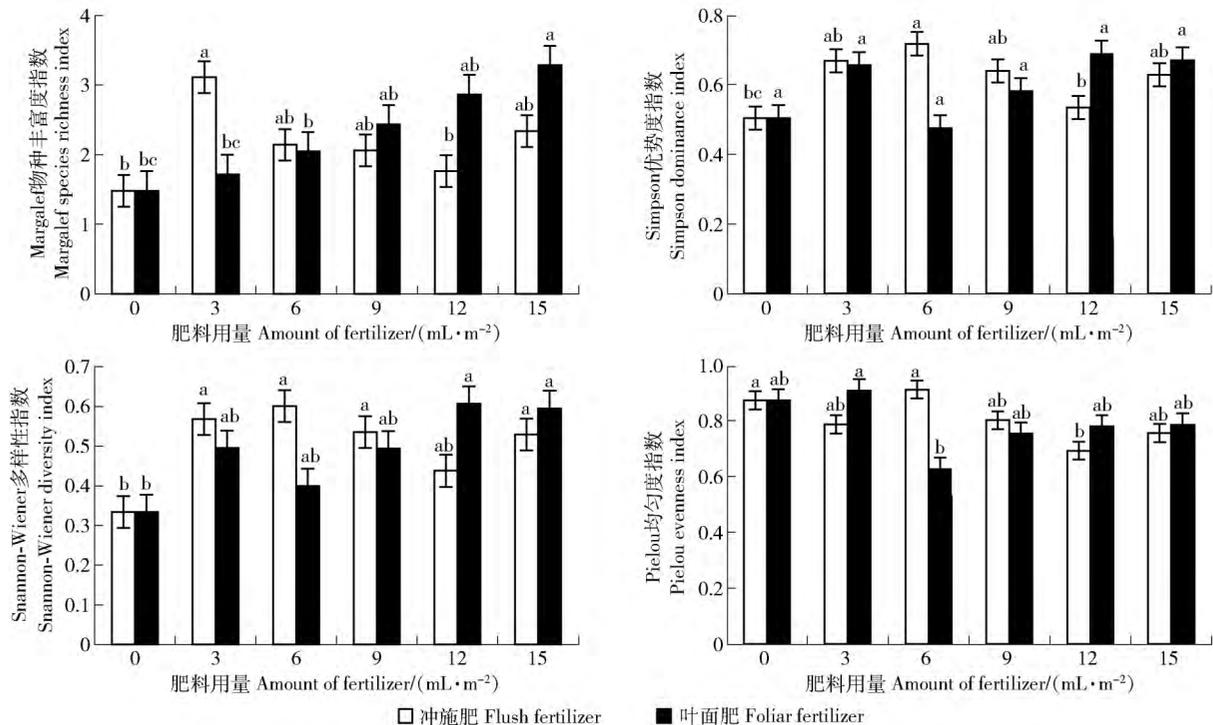
物种名称 Species name	CK	2 mL/m ²	4 mL/m ²	6 mL/m ²	8 mL/m ²	10 mL/m ²
杨柴 <i>Hedysarum fruticosum</i>	58.33	29.67	15.06	18.62	13.47	12.75
白蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	0	34.71	7.10	31.36	27.99	19.52
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	41.67	6.56	8.87	23.11	11.92	17.27
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	0	24.56	21.89	21.07	22.57	16.53
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0	0	12.32	0	6.57	12.52
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	0	9.56	11.42	14.18	15.94	7.28
针茅 <i>Stipa capillata</i>	0	0	10.59	0	0	6.40
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	0	0	0	10.61	0	0

不同的施肥方式对沙木蓼群落 Simpson 优势度指数的影响各异, 冲施肥对 Simpson 优势度指数的影响显著 ($P < 0.05$)。随着施肥量的增加呈先增加后减小的趋势, 在施肥量为 6 mL/m² 的 Simpson 优势度指数达到最大, 与对照和其余处理间差异显著 ($P < 0.05$); 冲施肥各处理的 Simpson 优势度指数分别是对照的 132.80%、142.43%、126.93%、106.16% 和 124.69%。叶面肥对 Simpson 优势度指数影响不显著 ($P > 0.05$)。与冲施肥 Simpson 优势度指数变化趋势相反, 在施肥量为 6 mL/m² 时 Simpson 优势度指数最低。

不同的施肥方式对沙木蓼群落 Shannon-Wiener 多样性指数具有不同的影响, 但冲施肥和叶面肥对

群落 Shannon-Wiener 多样性指数的影响均不显著 ($P > 0.05$)。冲施肥的 Shannon-Wiener 多样性指数除了用量为 12 mL/m² 的处理以外, 其他各处理均与对照有显著差异 ($P < 0.05$), 而叶面肥对照处理与高用量 (12、15 mL/m²) 的处理差异显著 ($P < 0.05$), 其他处理间无显著差异 ($P > 0.05$)。

不同的施肥方式对沙木蓼群落 Pielou 均匀度指数影响各异, 冲施肥和叶面肥对群落 Pielou 均匀度指数的影响都不显著 ($P > 0.05$)。冲施肥的 Pielou 均匀度指数在用量为 12 mL/m² 时与对照、用量为 6 mL/m² 有显著差异 ($P < 0.05$); 叶面肥的 Pielou 均匀度指数仅在用量为 3、6 mL/m² 之间形成显著差异 ($P < 0.05$)。



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters indicate significant difference among treatments at $P < 0.05$ level.

图 9 施肥对沙木蓼群落物种多样性的影响

Fig. 9 Effects of fertilization on the species diversity of *Atraphaxis bracteata*

3 讨 论

3.1 鲜海带生物酶解有机液肥对土壤理化性质的影响

本研究中,鲜海带生物酶解有机液肥改变了植物的营养循环过程,并对土壤的理化性质产生一定的影响。土壤水分随着鲜海带生物酶解有机液肥的增加而增加,这与其他人所研究的土壤水分随着氮素水平增加而降低^[22]不一致,主要是因为施加的氮素进入土壤后只有溶解到土壤水溶液中转化为离子状态才能被植物根系有效吸收,且氮肥含量越高,植被因生理过程对水分的需求越大,土壤含水率越低,而鲜海带生物酶解有机液肥是液体肥料,消耗土壤中的水分较少,可以使养分被植物根系吸收,并且鲜海带生物酶解有机液肥具有保水保肥的作用,所以增加了荒漠区土壤的含水量。并且本次研究发现,冲施肥土壤含水率较面肥研究区的土壤含水率稳定,变化幅度在0.1%~0.4%之间,说明冲施肥比叶面肥更有利于土壤保水,出现这样的结果原因可能有二:一、冲施肥与叶面肥的主要成分不同,冲施肥中含有海带纤维,据研究海带纤维的本质具有阻燃、电磁波屏蔽效应等功能以及良好的纺织加工性能^[23],那么海带纤维也可能在土壤中像保水剂一样抑制水分蒸发,提高土壤含水量,减少可溶性养分的损失,达到保水保肥的效果;二、因为冲施肥利用灌溉的方式,直接将有机液肥漫灌渗入土壤,沙地孔隙度大,入渗快,一部分被根部吸收,一部分直接被土壤吸收,使其更好的发挥保水保肥的作用;而叶面肥利用喷施的方式,先到植物再到土壤,液肥大部分都被沙木蓼叶片吸收,只有少部分进入土壤,导致叶面肥研究区土壤浅层含水率没有冲施肥研究区的高,这与赵岩等研究结果一致。同时,在高肥(12、15 mL/m²)的作用下,土壤水分也会降低,原因可能是由于荒漠地区地表植被覆盖率低、土壤水分蒸发快。而较低的含水率使植物不能有效的吸收养分,枯落物分解率减缓,生态系统中的养分循环速率减弱^[24],鲜海带生物酶解有机液肥中各种营养元素在土壤中累积,造成土壤全氮含量随着肥料用量的增大而增加。另外,土壤中氮含量增加会缓解该研究区土壤氮素的限制作用,氮素与有机质结合会降低土壤中的C/N,其在影响植被凋落物返还量的同时,也促进有机质的增加^[25-26]。

3.2 鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼生长的影响

增加土壤养分会改变植物各方面的适应对策,而生长和形态学适应是一种最基本的机制^[27-28]。本试验中随着鲜海带生物酶解有机液肥用量的增

加,沙木蓼地径、株高、新梢增长量均呈现先增加后减小的趋势,在用量为6 mL/m²时,生长量达到最大,冲施肥和叶面肥的地径、株高、新梢生长量分别是0.34和0.23 cm、43.21和21.8 cm、75.27和66.71 cm,之后生长量随着肥料用量的增大而减小,并且冲施肥的效果更优。施肥能增加荒漠化土壤中的养分,提高土壤肥力,推动土壤养分循环,促进植物营养的吸收^[25],从而使沙木蓼的生长量增加。但是随着肥料用量的增大,高肥水平的抑制效果明显。不同施肥方式中肥料用量对沙木蓼生长的影响出现差异的主要原因可能是:在毛乌素沙地,植物生长受营养元素限制时,鲜海带生物酶解有机液肥的添加会促进植物生长;在营养元素饱和或过量时,鲜海带生物酶解有机液肥对植物生长无影响或减缓植物生长,导致沙木蓼在高用量肥(12、15 mL/m²)的增长量降低。

3.3 鲜海带生物酶解有机液肥对沙木蓼群落物种丰富度以及物种多样性的影响

物种丰富度和物种多样性是生态环境稳定的重要标志^[29]。施肥不仅可改善荒漠化土壤理化性质,促进植物生长,也是恢复和提高土壤肥力,改变植物群落变化的有效手段。有研究表明,在高寒典型草地施氮、磷肥时,物种丰富度随着施肥水平的增加显著下降^[30],而本研究结果显示施肥使物种丰富度增加,可能是由于该地区物种丰富度基数低,植被群落间竞争引起的负效应要远远低于施肥驱动增加的丰富度^[31],也可能是因为鲜海带生物酶解有机液肥,富含植物所需的生长刺激素、活性营养物质和微量元素,而不是单单添加氮、磷等元素。同时,在沙木蓼群落中的杨柴、油蒿和白蒿对鲜海带生物酶解有机液肥的响应敏感。在荒漠化治理进行植物措施时,对荒漠化土壤进行鲜海带生物酶解有机液肥添加不仅可以改善其植被的物种组成,还能提高沙木蓼的高度。

目前,关于营养添加对植物群落物种多样性影响的研究很多,而对于荒漠植物群落物种多样性影响的研究比较少。从本研究中可以看出,不同的鲜海带生物酶解有机液肥处理对沙木蓼植物群落多样性的影响各异。鲜海带生物酶解有机液肥增加了沙木蓼群落的Margalef物种丰富度指数、Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数,冲施肥和叶面肥各处理的平均Margalef物种丰富度指数比对照的增加了53.97%、66.44%;冲施肥、叶面肥的Simpson优势度指数总体幅度都要比对照的增加了26.6%、22.02%;冲施肥和叶面肥的Shannon-Wiener多样性指数总体幅度都要相比对照增加了

60.12%、55.25%。植物群落 Pielou 均匀度指数随着肥料用量的增加而减小,冲施肥和叶面肥的 Pielou 均匀度指数总体幅度都要比对照的降低了 9.53%、11.67%。总的来说,施肥增加了物种数量和多样性。这与许多研究的施肥对植物群落多样性减少的结果相反。原因可能是鲜海带生物酶解有机液肥减缓了物种间及种内的竞争,相比氮、磷等肥富含的营养元素和活性营养物质多,促使沙木蓼群落的物种多样性增加。植物群落的多样性和它的生境条件与土壤营养有密切的联系,物种多样性是随着土壤资源类型分布的不同而变化^[32]。毛乌素沙地土壤有机质含量低,土质瘠薄,鲜海带生物酶解有机液肥使土壤有机质增加,土壤表层结构改善,土壤向良性循环方向发展,从而群落多样性增加。

4 结 论

在毛乌素沙地施鲜海带生物酶解有机液肥不仅有效的增加了土壤的含水率、土壤全氮和有机质的含量,而且可以促进沙木蓼的生长,其地径、株高和新梢增长量都随着施肥量的增加呈先增加后减小的趋势。同时,增加了沙木蓼群落的物种组成、物种丰富度、Margalef 物种丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数,降低了 Pielou 均匀度指数,但总体增加了沙木蓼群落物种多样性。由此可以建议,在干旱区、半干旱区沙地固沙造林时,鉴于沙地土壤瘠薄、保水保肥能力差等特点,可以适当进行鲜海带生物酶解有机液肥的使用,增加荒漠化土壤的养分,提高苗木成活率,促进植物生长,增加群落物种多样性;尤其是对于 4 年以上生的沙木蓼,为减少其枝条枯死现象,可以使用鲜海带生物酶解有机液肥促进沙木蓼生长,更好的发挥防风固沙的作用,促进植被恢复,改善荒漠化地区的生态环境。

参 考 文 献

- [1] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 1.
Sun B P. Desertification engineering [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000: 1.
- [2] 韩东锋, 孙德祥, 周广阔, 等. 半荒漠风沙区 5 种优良沙生灌木造林效果比较[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 312-315.
Han D F, Sun D X, Zhou G K, et al. Comparison among the afforestation effects of 5 excellent desert shrubs in semi-desert area [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 312-315.
- [3] 赵岩, 周文渊, 孙保平, 等. 毛乌素沙地三种荒漠灌木根系分布特征与土壤水分研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 129-133.
Zhao Y, Zhou W Y, Sun B P, et al. Root distribution of three desert shrubs and soil moisture in Mu Us Sand Land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4): 129-133.
- [4] Harpole W S, Potts D L, Suding K N. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland [J]. Global Change Biology, 2007, 13(11): 2341-2348.
- [5] 周国英, 陈桂琛, 赵以莲, 等. 施肥和围栏封育对青海湖地区高寒草原影响的比较研究 II 地上生物量季节动态[J]. 草业科学, 2005, 22(1): 59-63.
Zhou G Y, Chen G C, Zhao Y L, et al. Comparative studies on influence of chemical fertilizer application and enclosure on alpine steppes in Qinghai Lake (II): seasonal and annual biomass dynamics [J]. Pratacultural Science, 2005, 22(1): 59-63.
- [6] 王大明. 试论高寒人工草地施氮的增产效应[J]. 中国草地, 1994, 16(2): 76-80.
Wang D M. A discussion on incremental response of to alpine sown pasture N application [J]. Grassland of China, 1994, 16(2): 76-80.
- [7] 孙斌. 三种改良措施对高寒退化草地植被的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(6): 797-801.
Sun B. Three grassland improvement measures on alpine degraded grassland vegetation [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2005, 40(6): 797-801.
- [8] 纪亚君. 青海高寒天然草地施氮肥试验[J]. 中国草地, 2005, 27(6): 69-71.
Ji Y J. Effects of nitrogen on grass yield in Qinghai alpine meadow [J]. Grassland of China, 2005, 27(6): 69-71.
- [9] 仁青吉, 罗燕江, 王海洋, 等. 青藏高原典型高寒草甸退化草地的恢复: 施肥刈割对草地质量的影响[J]. 草业学报, 2004, 13(2): 43-49.
Ren Q J, Luo Y J, Wang H Y, et al. Restoration of degraded typical meadowland on the Qinghai-Tibetan Plateau: effect of fertilizing and cutting on grassland quality [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(2): 43-49.
- [10] 李燕婷, 肖艳, 李秀英, 等. 作物叶面施肥技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 11.
Li Y T, Xiao Y, Li X Y, et al. The foliar fertilization technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2009: 11.
- [11] 王周琼, 李述刚, 程心俊. 有机无机复合与荒漠化防治[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 92-212.
Wang Z Q, Li S G, Cheng X J. Organic inorganic compound and prevention of desertification [M]. Beijing: Science Press, 2003: 92-212.
- [12] 马红梅, 王锁民, 张建全, 等. 专用有机肥对荒漠植物梭梭的生长及耐旱性的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(2): 240-248.
Ma H M, Wang S M, Zhang J Q, et al. The special organic fertilizer in improving the growth and drought tolerance of desert plant *Haloxylon ammodendron* [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(2): 240-248.
- [13] Goldberg D E, Miller T E. Effects of different resource additions of species diversity in an annual plant community [J]. Ecology, 1990, 71(1): 213-225.
- [14] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 88-

94.
Wang J S, Zhao X H, Zhang C Y, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen content in plantation and natural forests of *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 88-94.
- [15] Xu W W, Liu H Y, Tan X S, et al. Effects of seaweed bio-organic fertilizer on growth and yield of winter wheat [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(11): 2555-2559.
- [16] Liu P J, Wang F, Zhang S Q. Effect of seaweed bio-organic fertilizer on seed germination and seedling growth of vegetables [J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(3): 407-411.
- [17] 张军红. 毛乌素沙地油蒿群落土壤水分分布与动态 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
Zhang J H. Distribution and dynamics of soil moisture in *Artemisia ordosica* communities in Mu Us Sandy Land [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [18] 李博. 生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 118-119.
Li B. Ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 118-119.
- [19] 王莉, 秦树高, 张宇清, 等. 生物土壤结皮对毛乌素沙地油蒿群落土壤水分的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 48-56.
Wang L, Qin S G, Zhang Y Q, et al. Influence of biological soil crusts on soil moisture in *Artemisia ordosica* community in Mu Us Desert, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(3): 48-56.
- [20] 穆家伟, 查天山, 贾昕, 等. 毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 39-45.
Mu J W, Zha T S, Jia X, et al. Influence of typical sandy shrubs on soil evaporation in Mu Us Sandland, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 39-45.
- [21] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 82-85 89.
Wang G L, Duan J N, Jia N F, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 82-85 89.
- [22] 苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 664-670.
Su J Q, Li X R, Bao J T. Effects of nitrogen addition on soil physico-chemical properties and enzyme activities in desertified steppe [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 664-670.
- [23] 胡静. 绿色纤维的应用及发展 [J]. 科技创新导报, 2013(11): 66.
Hu J. The application and development of green fiber [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(11): 66.
- [24] Vourlitis G L, Pasquini S, Zorba G. Plant and soil N response of southern Californian semi-arid shrub lands after 1 year of experimental N deposition [J]. Ecosystems, 2007, 10: 263-279.
- [25] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 华西雨屏区苦竹林土壤酶活性对模拟氮沉降的响应 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2943-2948.
Tu L H, Hu T X, Zhang J, et al. Soil enzyme activities in a *Pleioblastus amurus* plantation in rainy area of west China under simulated nitrogen deposition [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2943-2948.
- [26] Patterson T B, Guy R D, Dang Q L. W. Hole-plant nitrogen and water-relations traits, and their associated tradeoffs, in adjacent muskeg and upland boreal spruce species [J]. Oecologia, 1997, 110(2): 160-168.
- [27] 刘彤, 王琛, 徐璐, 等. 叶面施氮对东北红豆杉幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 64-70.
Liu T, Wang C, Xu L, et al. Effects of foliar nitrogen application on growth and photosynthetic characteristics of *Taxus cuspidata* seedlings [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 64-70.
- [28] 李宜伟, 蒋进, 宋春武, 等. 发酵肥料对沙地水分与植物生长的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 161-166.
Li Y W, Jiang J, Song C W, et al. Effects of fermented manure on sandy land soil moisture and growth of plants [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2): 161-166.
- [29] 陈亚明, 李自珍, 杜国祯. 施肥对高寒草甸植物多样性和经济类群的影响 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(3): 424-429.
Chen Y M, Li Z Z, Du G Z. Effects of fertilization on plant diversity and economic herbage groups in alpine meadow [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(3): 424-429.
- [30] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响 [J]. 草业学报, 2007, 16(5): 34-39.
Zheng H P, Chen Z X, Wang S R, et al. Effects of fertilizer on plant diversity and productivity of desertified alpine grassland at Maqu, Gansu [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(5): 34-39.
- [31] 王堃, 吕进英, 邵新庆. 沙漠化草地的恢复与重建途径 [J]. 草地学报, 2004, 12(3): 240-245.
Wang K, Lü J Y, Shao X Q. Measures of restoring and rebuilding desertified grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2004, 12(3): 240-245.
- [32] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 不同类型高寒草地群落物种特征和均匀度的重要性 [J]. 草地学报, 2005, 13(4): 320-323.
Wang C T, Long R J, Wang Q J, et al. Importance of species characteristics and evenness in different type grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13(4): 320-323.

(责任编辑 范娟
责任编辑 孙向阳)